

## 5-2 微動アレー探査の概要

### 5-2-1 計画準備

本業務を円滑かつ計画的に逐行するにあたり、調査目的に基づき探査位置およびアレー半径、地震計配置の検討、観測日程の調整および用地状況の確認を行い、諸作業の準備を行った。

### 5-2-2 微動アレー探査の実施

本安曇野市を東西方向に横断する測線設定とし、2018年に11地点（A測線6地点、B測線5地点）、2019年に10地点（C測線6地点、D測線4地点）で実施した。南部の1地点（AZM2018A-01）については2019年に再観測と再解析を行った。

#### （1）探査原理

地震波は図5.2に示す通り複数存在し、P波やS波の実体波は、物質内を伝播する波動であり、境界波は物質の境界を伝播する波動である。表面波は、自由面に接する物質内を伝播する境界波の一種であり、地球表面においてもレイリー波やラブ波という表面波が存在する。

実体波と境界波の大きな違いは、実体波は分散性を有しないが、境界波は分散性を有するということである。波動の分散性とは、周波数によって波動の伝播速度が変わる、ということである。

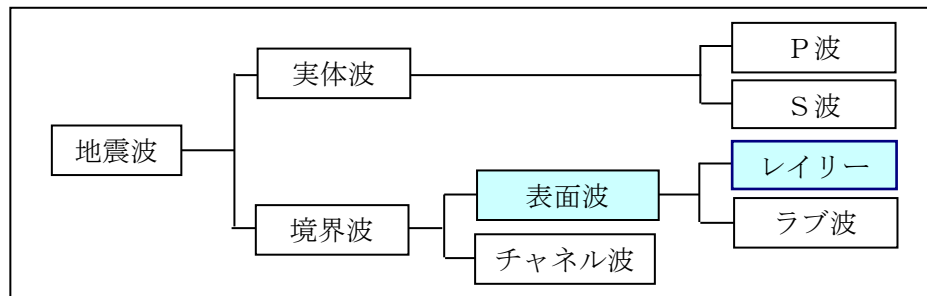


図 5.2 地震波の種類

地表には人為的な振動や自然に起因する様々な波動が常時伝播しており、特に震源を特定できない微小な振動を「微動」と称している。この微動は実体波や表面波からなり、微動の波動現象には、発生源、伝播経路、地下構造などによる様々な影響因子を包含している。人為的な微動は、一般的には車輛振動に起因し、周期1秒以下であり、振幅に明瞭な日変化が認められる特徴がある。自然現象に起因する波動は周期1秒以上の波で、主として気圧変化に伴う風や波浪等の自然現象が発生源であり、それらの現象の規模によって振幅は変化している（図5.3）。

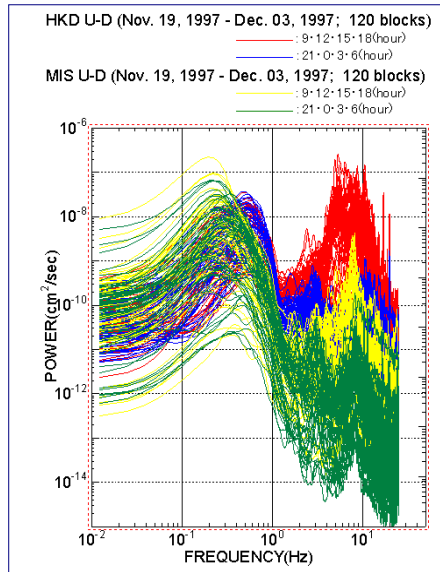


図 5.3 微動のスペクトル

地表の微動は、多くの場合表面波が優勢である。

表面波は実体波と異なり、地盤を伝わる速さが周波数によって変化する性質（位相速度の分散現象）がある。この表面波の分散特性は、地下構造を正確に反映する。分散特性（変化のパターン）は、地下のS波速度構造の違いによって明瞭に異なり、表面波の分散特性（表面波の周波数と伝播速度の関係）がわかれば、地下構造を推定できることになる（図 5.4）。

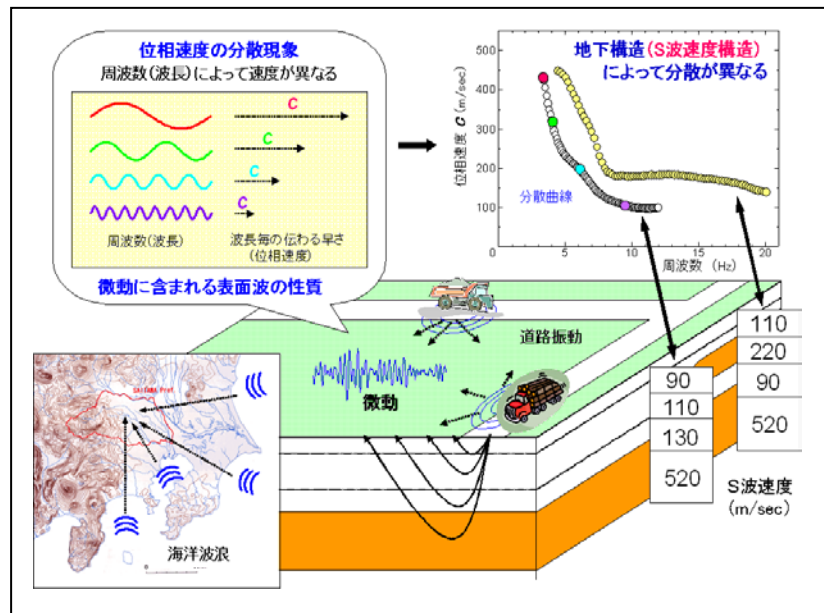


図 5.4 微動アレー探査の模式図

## (2) 探査機器の準備

微動アレー探査に際しては、以下の仕様の地震計を使用した。

- ① 地震計（振動計）：佐藤商事株式会社製 MTK-1V（図 5.5 左と中央）

出力感度 : 13V/cm/s (固有周期 1 秒)、0.25V/cm/s (固有周期 7 秒)  
 測定周波数範囲 : 1Hz~50Hz (固有周期 1 秒)、0.13Hz~50Hz (固有周期 7 秒)  
 測定成分 : 上下方向  
 変換方式 : 速度型(動電)型  
 測定範囲 : ±2mm  
 使用温度範囲 : -20~+50°C

② 独立型観測システム (白山工業 LS8800SH) (図 2.4 右)

- ・チャンネル数 : 3
- ・ゲイン : 1,2,4,8,16 倍
- ・微動計の制動抵抗 : 3 秒, 7 秒
- ・ローパスフィルタ : 30,60,120,240Hz, フィルタ未使用
- ・分解能 : 24bit
- ・サンプリング : 100Hz,200Hz
- ・記録容量 : SD・SDHC メモリーカード使用可能
- ・時刻修正 : GPS 受信方式 (基準時計精度±1ppm)

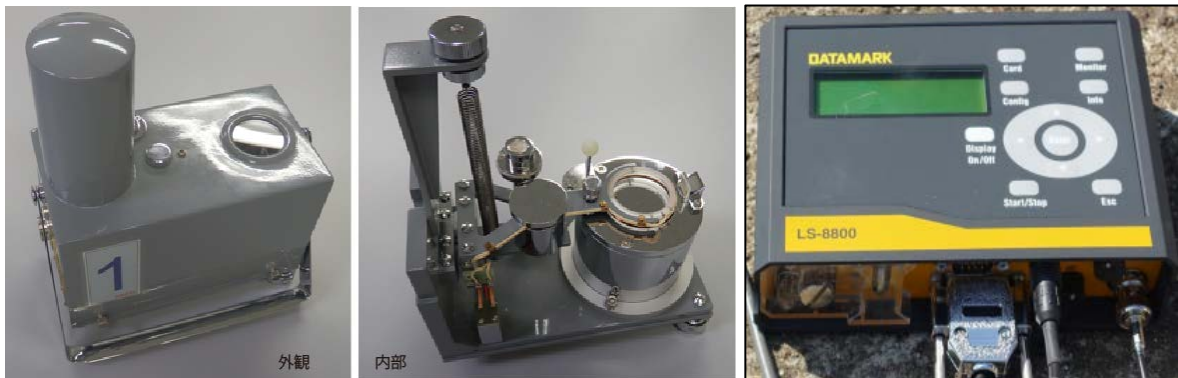


図 5.5 使用した地震計 (左および中央) とロガー (右)

(3) ハドルテスト

測定に先立ってハドルテストを実施し、地震計の特性が揃っていることを確認した。

ハドルテストにおいては、各地震計で観測したパワースペクトル、異なる地震計で観測したデータ間のコヒーレンス、位相差から判断した。

(4) 観測点の設置

各観測点の設置に際しては、現地で光波測量、テープ測量でアレー配置を決定した。

観測点の水平方向の位置精度は、アレー半径の 3%以下となるように決定した。

また、表 5.2 に各地点の地震計の位置座標と観測アレーの内容を示す。

表 5.2 各観測点の位置座標および観測アレーの内容

測線	観測点	地名	名称	用途	緯度	経度	標高	アレー配置
2018A	AZM2018A-01	豊科高家	豊科高家スポーツ広場	グラウンド	36° 16'43.75"N	137° 56'24.09"E	562m	30-50-100m(SINGLE)
	AZM2018A-02	豊科		耕作地(水田)	36° 16'44.05"N	137° 55'7.69"E	567m	30m(SINGLE) 50-100m(ESPAC)
	AZM2018A-03	三郷明盛		耕作地(水田)	36° 16'59.51"N	137° 53'54.98"E	573m	30-50-100m(SINGLE)
	AZM2018A-04	三郷明盛		耕作地(水田)	36° 16'52.12"N	137° 53'3.92"E	580m	30m(SINGLE) 50-100m(ESPAC)
	AZM2018A-05	掘金三田		耕作地(水田)	36° 16'41.35"N	137° 52'11.06"E	595m	25-50m(ESPAC)
2018B	AZM2018B-01	豊科田沢		耕作地(水田・畑)	36° 18'32.52"N	137° 56'2.05"E	542m	30m(SINGLE) 50-100m(ESPAC)
	AZM2018B-02	豊科田沢		耕作地(水田・畑)	36° 18'35.50"N	137° 55'30.43"E	541m	30-90m(SINGLE)
	AZM2018B-03	豊科南穂高		耕作地(水田・畑)	36° 18'42.96"N	137° 54'53.81"E	539m	30m(SINGLE) 50-100m(ESPAC)
	AZM2018B-04	豊科南穂高		耕作地(水田・畑)	36° 18'34.32"N	137° 54'15.65"E	541m	30m(SINGLE) 50-100m(ESPAC)
	AZM2018B-05	掘金烏川		耕作地(水田)	36° 18'18.94"N	137° 53'24.88"E	551m	30m(SINGLE) 50-100m(ESPAC)
	AZM2018B-06	掘金烏川	南安曇農業高校第二農場	耕作地(水田)等	36° 18'10.67"N	137° 51'46.84"E	597m	30-60m(ESPAC)
2019C	AZM2019C-01	明科光		耕作地(水田)	36° 20'5.88"N	137° 55'10.29"E	527m	50-100m(ESPAC) 30m(SINGLE)
	AZM2019C-02	穂高		耕作地(水田)	36° 20'12.28"N	137° 53'55.85"E	527m	30m(SINGLE) 50-100m(ESPAC)
	AZM2019C-03	穂高	穂高商業高校グラウンド	野球場	36° 20'9.22"N	137° 53'9.91"E	543m	10m(SINGLE) 25-50m(ESPAC)
	AZM2019C-04	穂高柏原		耕作地(水田)	36° 19'46.09"N	137° 52'45.93"E	557m	30m(SINGLE) 50-100m(ESPAC)
	AZM2019C-05	穂高		耕作地(水田)	36° 19'49.17"N	137° 52'9.36"E	574m	20m(SINGLE) 45-90m(ESPAC)
	AZM2019C-06	穂高		耕作地(水田)	36° 19'54.25"N	137° 51'24.67"E	594m	20m(SINGLE) 45-90m(ESPAC)
2019D	AZM2019D-01	明科東川手	明科高校グラウンド	運動場	36° 21'43.89"N	137° 55'40.68"E	514m	20m(SINGLE) 40-80m(ESPAC)
	AZM2019D-02	明科七貴		耕作地(水田)	36° 21'48.60"N	137° 53'42.46"E	536m	30m(SINGLE) 50-100m(ESPAC)
	AZM2019D-03	穂高北穂高		耕作地(水田)	36° 21'52.67"N	137° 52'49.09"E	542m	30m(SINGLE) 50-100m(ESPAC)
	AZM2019D-04	穂高有明		耕作地(水田)	36° 21'41.08"N	137° 51'47.14"E	553m	30m(SINGLE) 50-100m(ESPAC)

【2019再観測】 2018A-01(豊科高家スポーツ広場)

測線	観測点	地名	名称	用途	緯度	経度	標高	アレー配置
2018A	AZM2018A-01	豊科高家	豊科高家スポーツ広場	グラウンド	36° 16'43.75"N	137° 56'24.09"E	562m	90m(SINGLE)

緯度経度は最大アレーの中心点

### (5) 微動の観測と撤去

今回の探査では微動の観測時間として小アレー(半径 10m~30m)で 20 分、中~大アレーで(半径 50~100m) 40~60 分の観測を行った。

各観測点については、観測終了後に観測機器を撤去し原形復旧を行った。

### 5-3 微動アレー探査結果

観測データからレイリー波の位相速度を算出し、これを逆解析することにより観測点直下の平均的なS波速度構造を求めた。

あああ

#### 5-3-1 微動アレー探査の流れ

微動アレー探査・解析の流れを図5.28に示す。

表面波位相速度の検出は、①観測した微動から、②表面波を分散の形（位相速度—周期の関係）で検出する（観測分散曲線の作成）。

S波速度構造の推定は、③観測分散曲線に適合するS波速度構造モデルを逆解析により決定する。

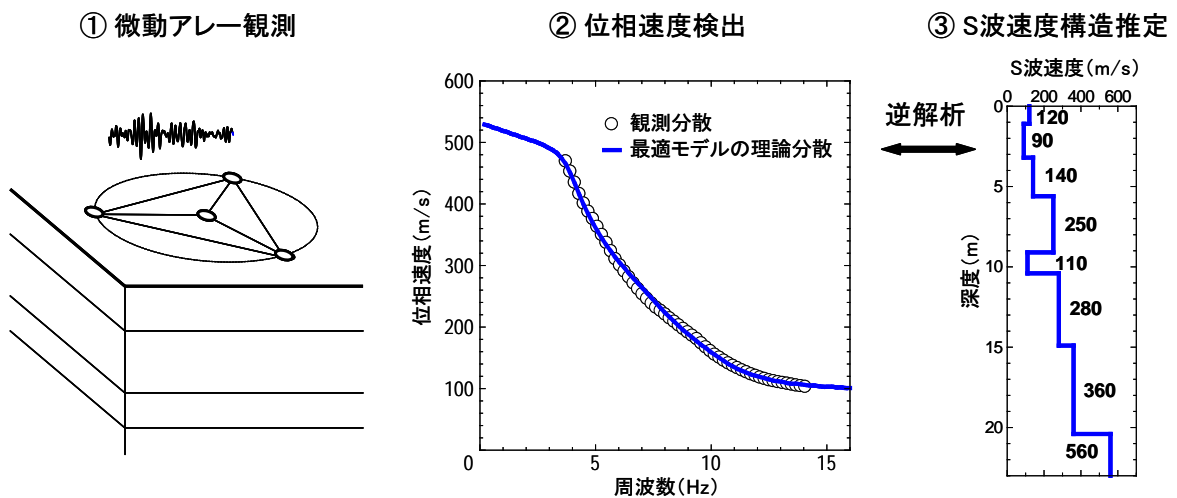


図 5.28 微動アレー探査・解析の流れ

#### 5-3-2 表面波の抽出（分散曲線の計算）

空間自己相関法（SPAC法）では、アレー中心点と各円周点間の波形相関性を複素コーヒール関数（実部）で表現し、全周平均（方位平均した値）を空間自己相関係数と呼ぶ。

この値が理論的に位相速度を変数に含むベッセル関数（第1種0次）に等しくなるため、その逆関数から位相速度を計算する（図5.29）。

三角形アレー配置で、表面波の分散特性を抽出できることは、岡田（2001）によって、理論的に証明されている。

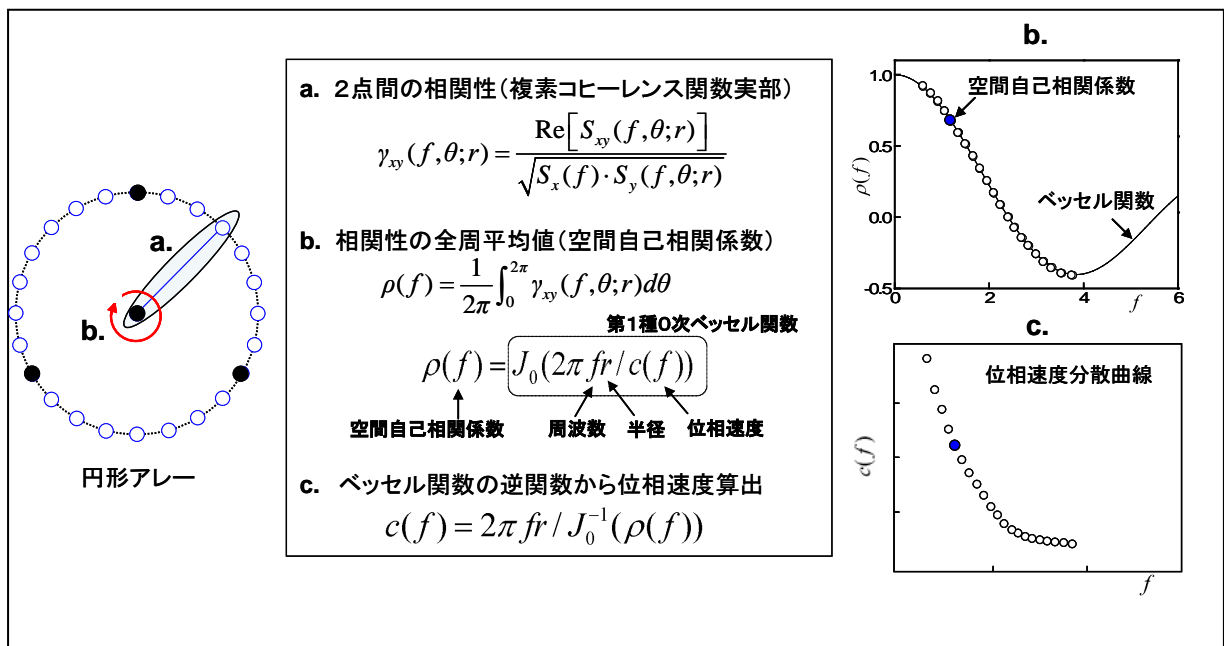


図 5.29 位相速度検出の方法 (観測分散曲線)

### 5-3-3 S波速度構造の推定 (逆解析)

得られた分散曲線を「レイリー波基本モード」の分散曲線とし、アレー直下の地下構造を多層半無限水平成層構造として推定する。レイリー波位相速度は、層数、層厚、各層のP波速度、S波速度および密度をパラメータとする関数である。層数を  $n$  とするとき、未知パラメータの総数は  $4n-1$  個である (最下部の層は半無限層である)。

レイリー波分散曲線の変化に強く寄与するパラメータはS波速度と層厚、特にS波速度であり、P波速度や密度の寄与は、S波速度よりも1~2桁以上小さいことがわかっている。

P波速度および密度は、既存の統計資料から推定しても影響は極めて小さい。このとき、未知パラメータ(S波速度および層厚)の個数は、当初の約半分の  $2n-1$  個にまで減少する。

本解析では、初期モデルへの依存性を解決する手段として、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm、略称 GA) による地下構造推定法を用いた。

GAの解析内容を図 5.30 に示す。GAでは初期モデルとして層の数、各層の層厚の最大値・最小値、S波速度の最大値・最小値を与え、これらの範囲内で残差最小解を求める。GAは順問題という性格上、計算が不安定になる可能性がないなどの特徴を有する。

初期モデルは図 5.31 に示すように、擬似位相速度断面を作成し、速度変化傾向から層厚、S波速度を仮定し決定する。

探索範囲、GA計算条件設定は、作成した初期モデルをもとに、広い探索範囲を設定し、十分の最大世代交代数 (500 世代) で 10 回の GA 計算を実施する (初回の GA 解析)。

初回 GA 計算結果の処置として、10 回の GA 計算結果から、事前情報との適合性など良好な解析結果と判断されたモデルを選択し、必要に応じて再解析を実施することにより最適モデルを決定する。

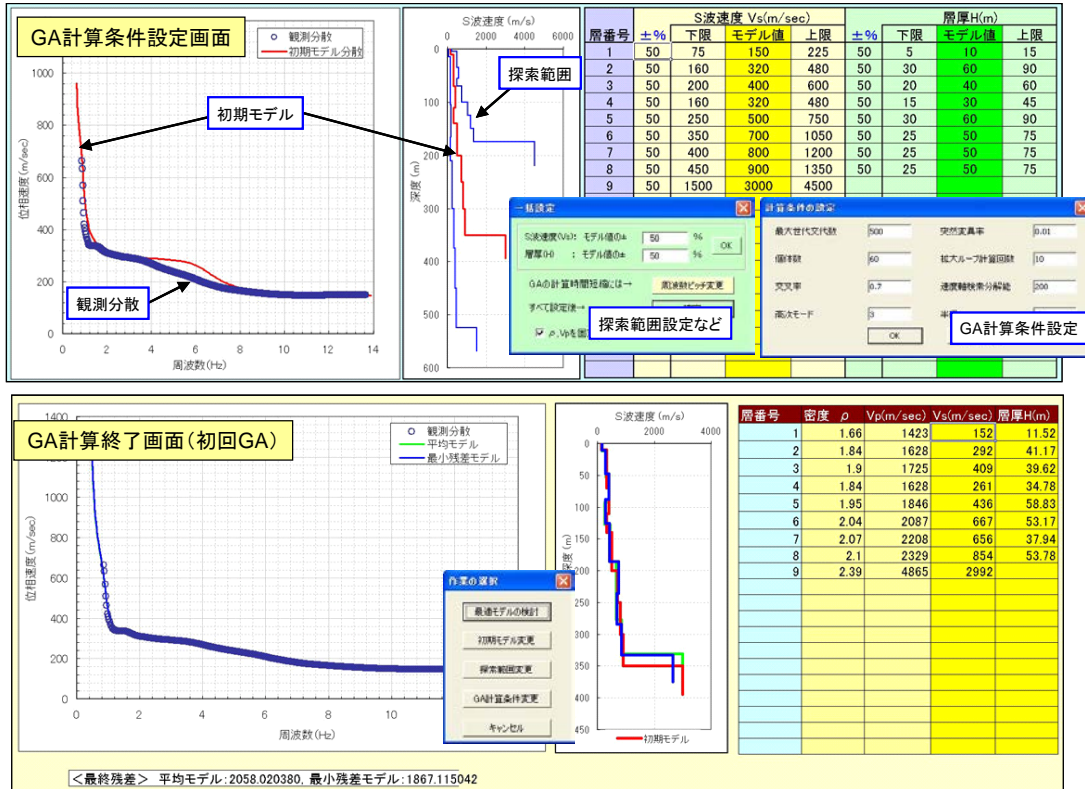


図 5.30 微動アレー探査 解析ソフトの処理画面

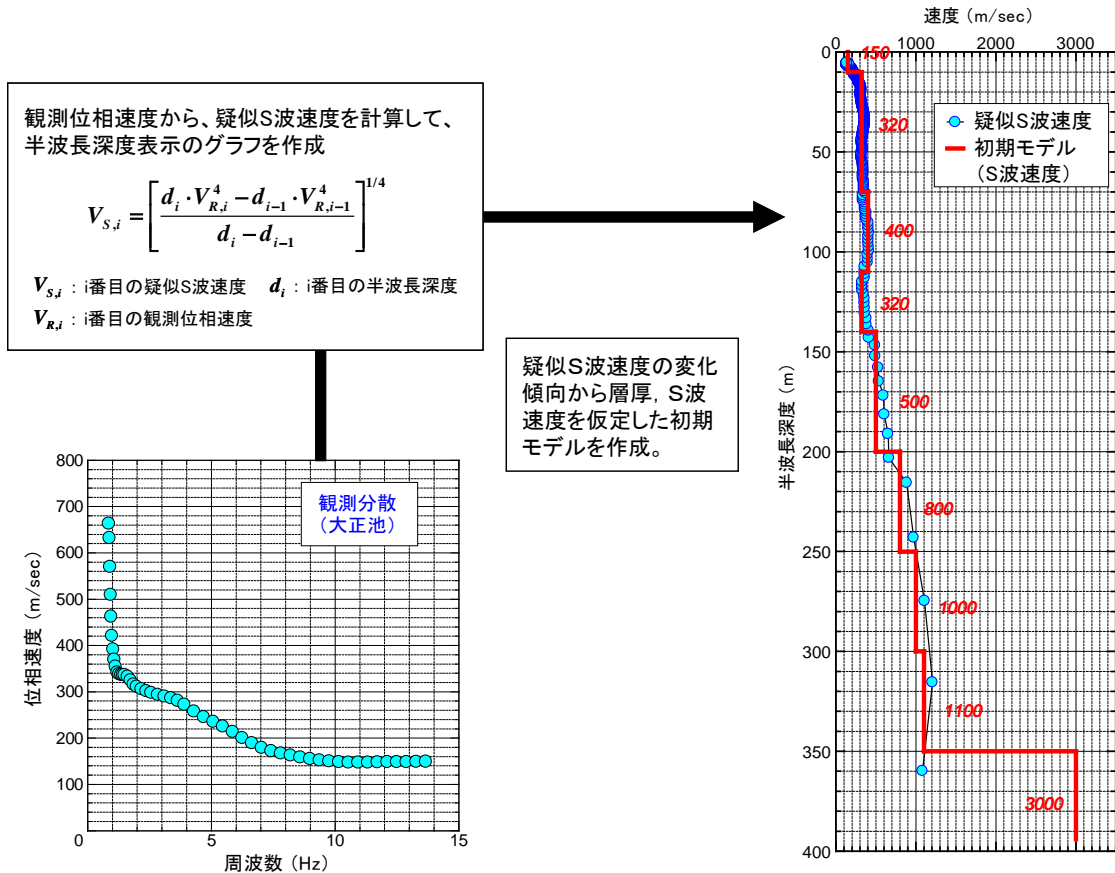


図 5.31 解析での初期モデルの作成手順

## 5-4 解析結果

### 5-4-1 観測分散

各測点で観測した微動波形から抽出した表面波の分散曲線（周波数リニア表示）を図 5.32～図 5.35 に示す。また、各測線の分散曲線の重ね合わせを図 5.36～図 5.39 に示す。また、全地点の分散曲線の重ね合わせ図を図 5.40 に示す。

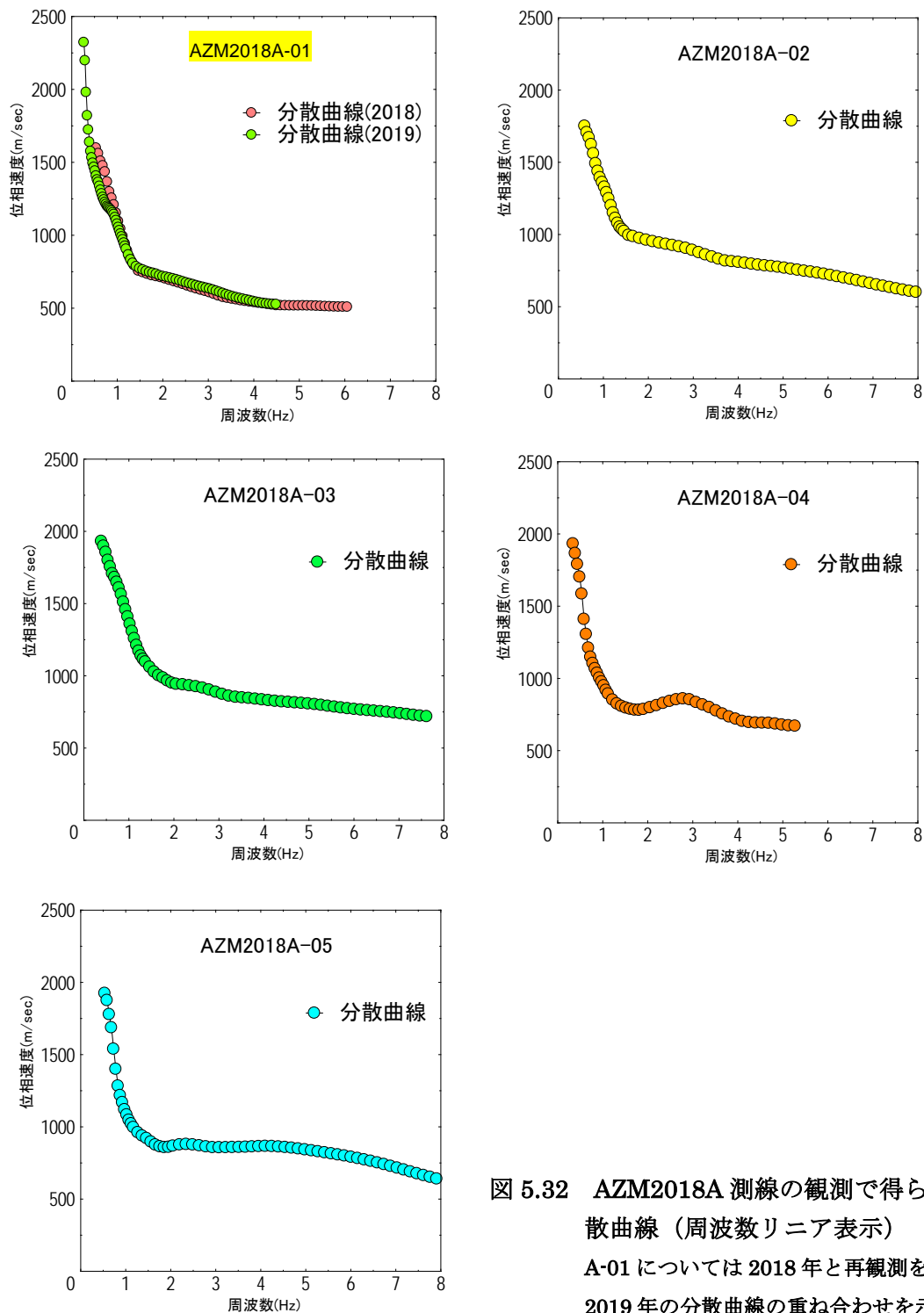


図 5.32 AZM2018A 測線の観測で得られた分散曲線（周波数リニア表示）  
A-01 については 2018 年と再観測を行った 2019 年の分散曲線の重ね合わせを示す。



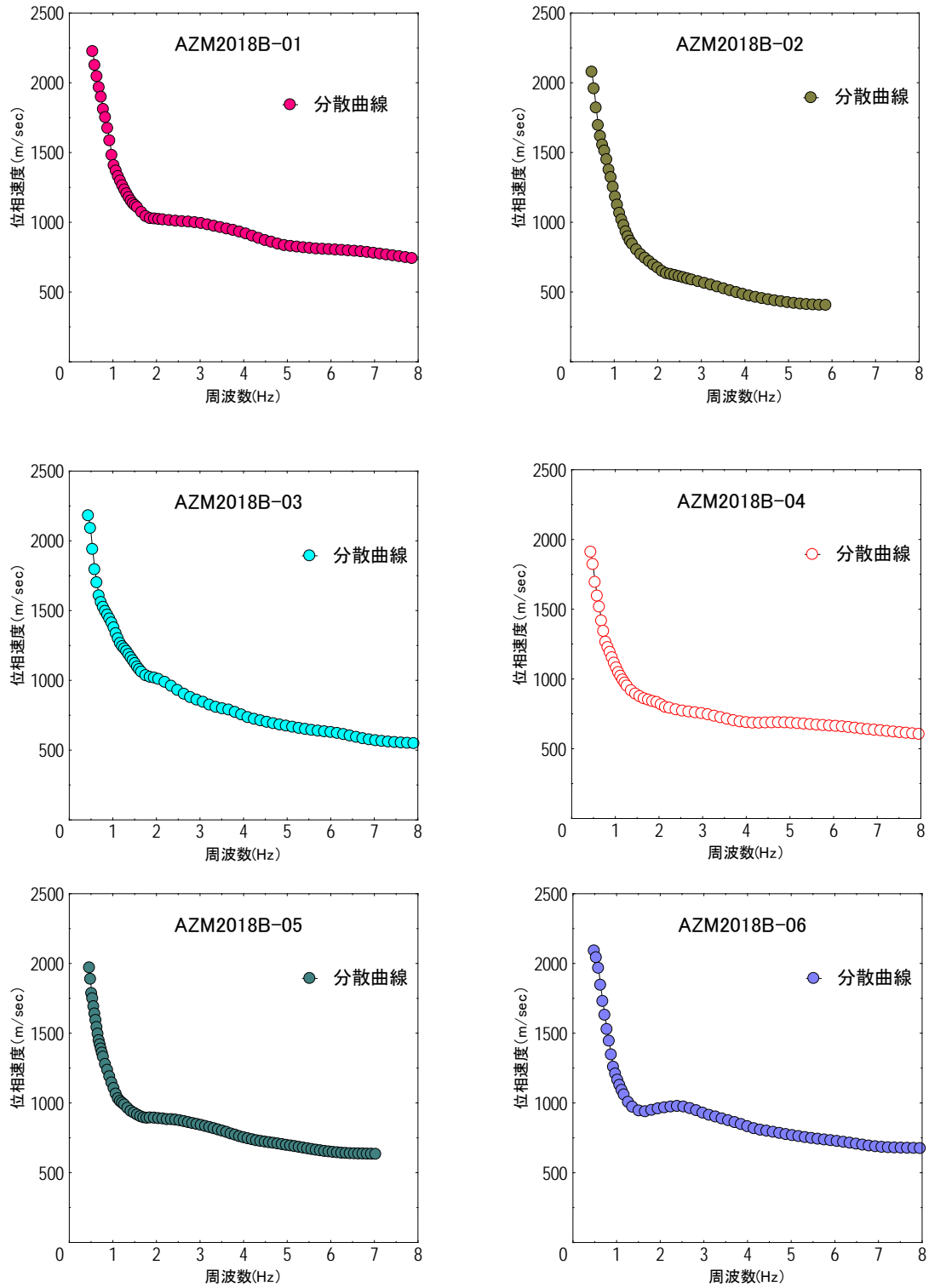


図 5.33 AZM2018B 測線の観測で得られた分散曲線 (周波数リニア表示)

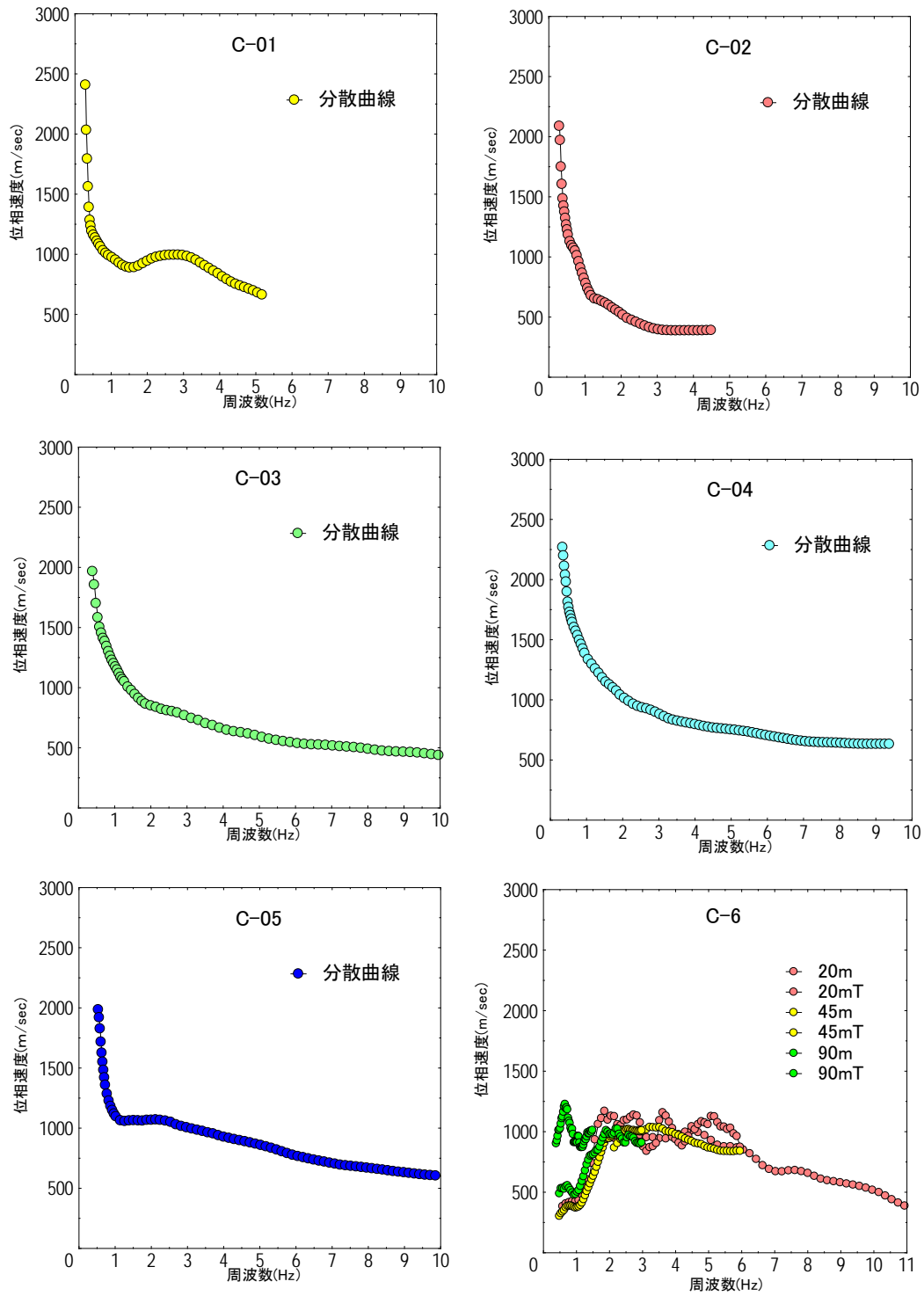


図 5.34 AZM2019C 測線の観測で得られた分散曲線 (周波数リニア表示)  
2019C-06 についてはアレーごとの分散曲線を示す。

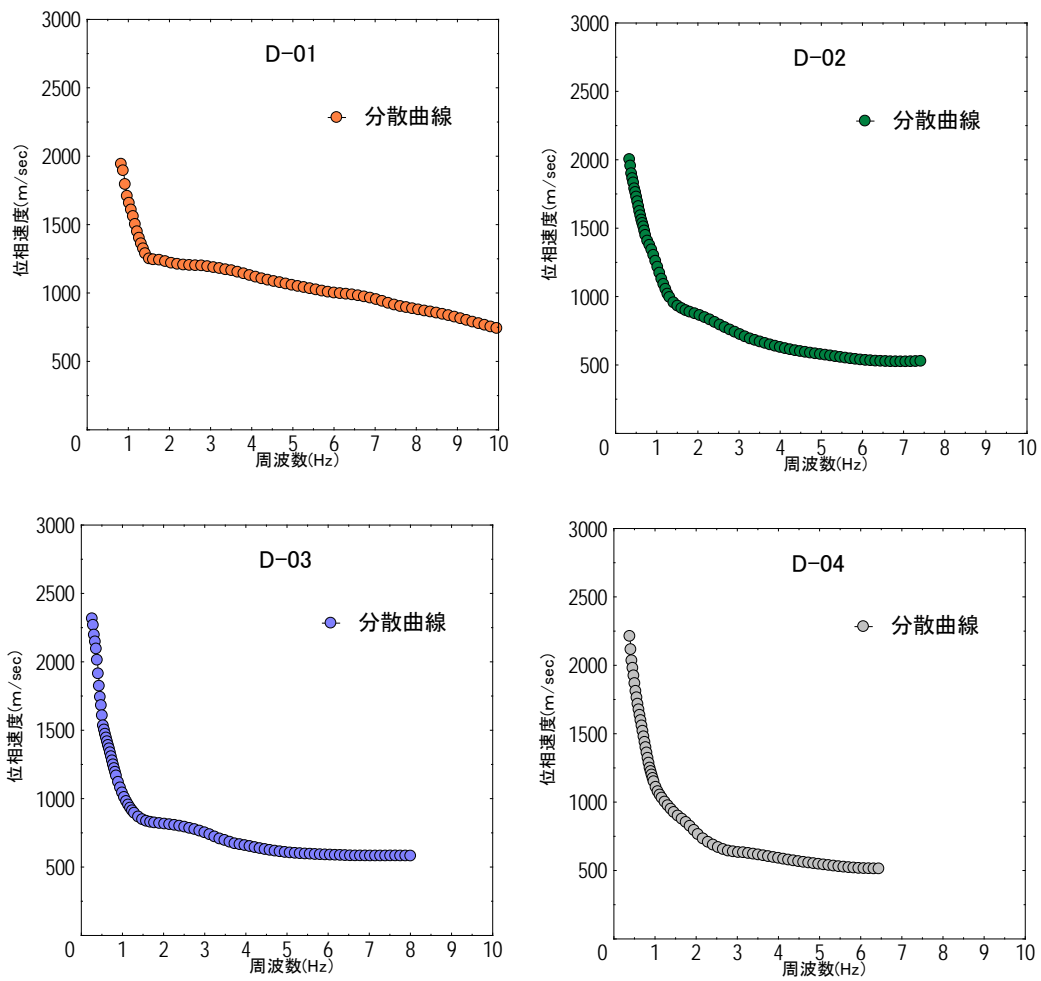


図 5.35 AZM2019D 測線の観測で得られた分散曲線

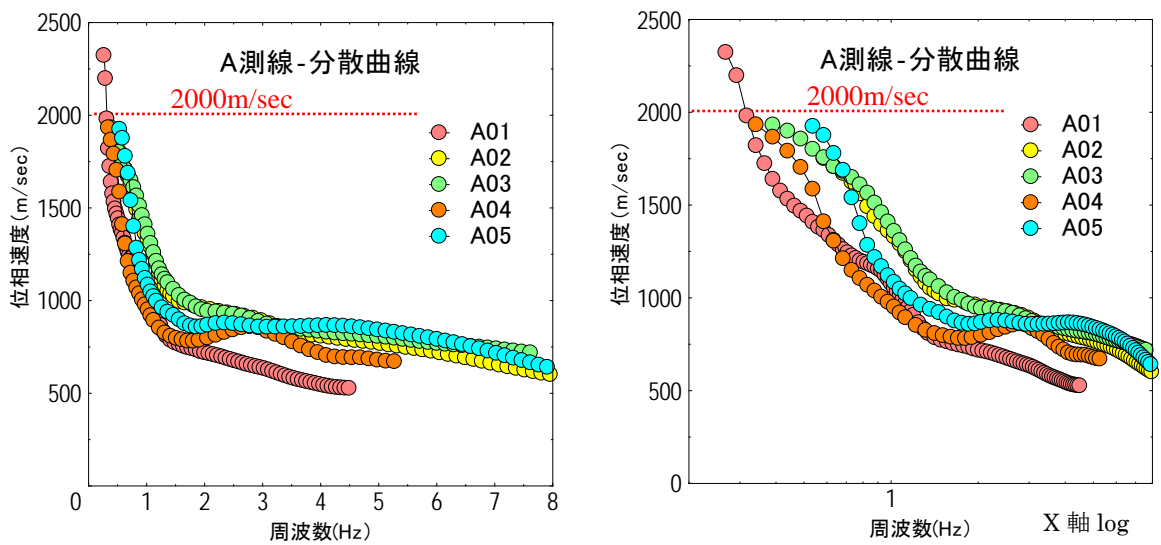


図 5.36 2018A 測線の分散曲線の重ね合わせ (左: 周波数リニア表示、右: 周波数対数表)

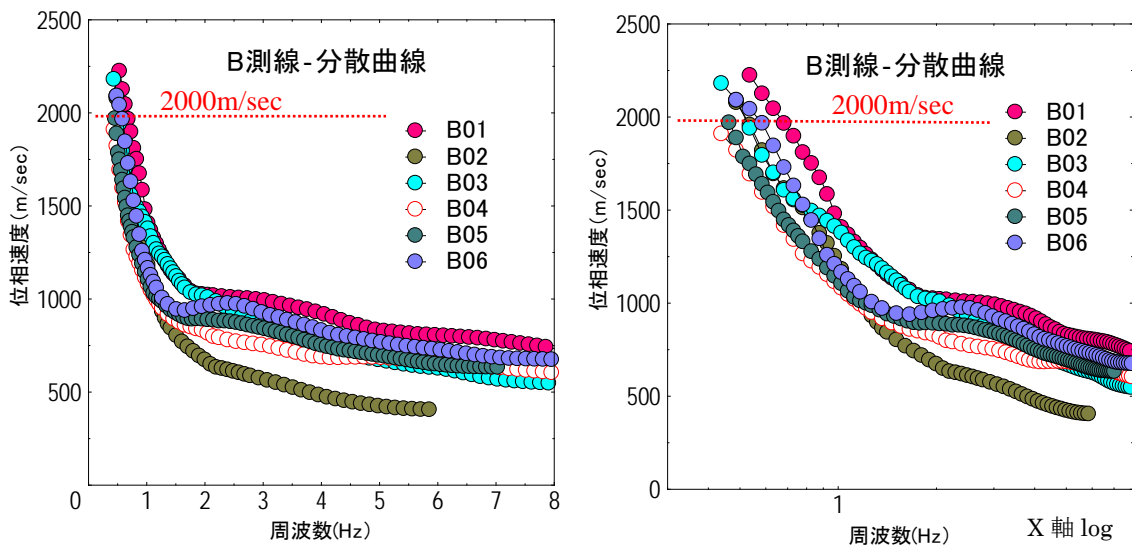


図 5.37 2018B 測線の分散曲線の重ね合わせ (左：周波数リニア表示、右：周波数対数表)

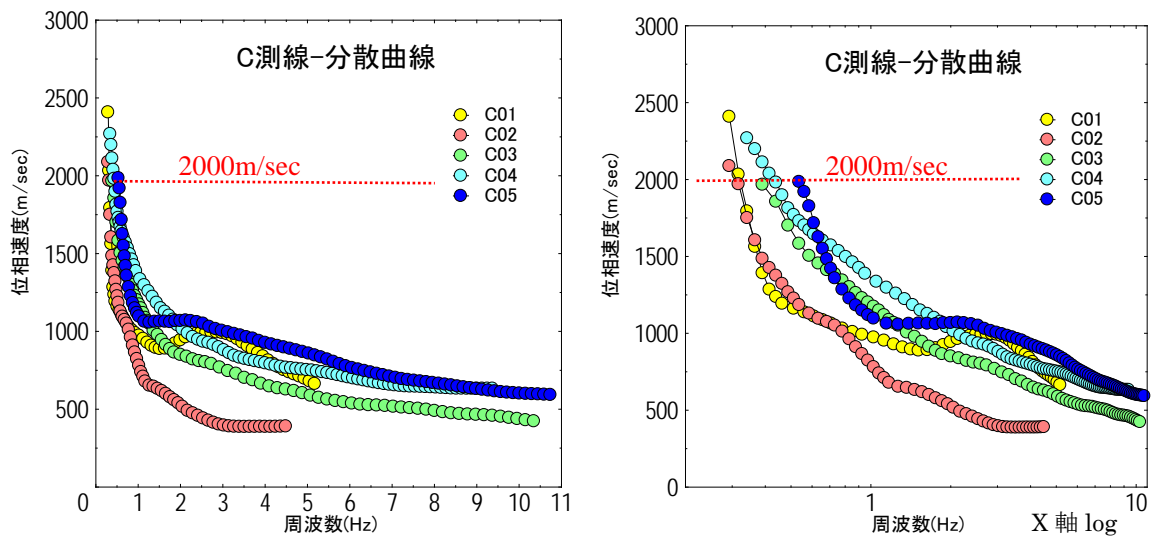


図 5.38 2019C 測線の分散曲線の重ね合わせ (左：周波数リニア表示、右：周波数対数表)

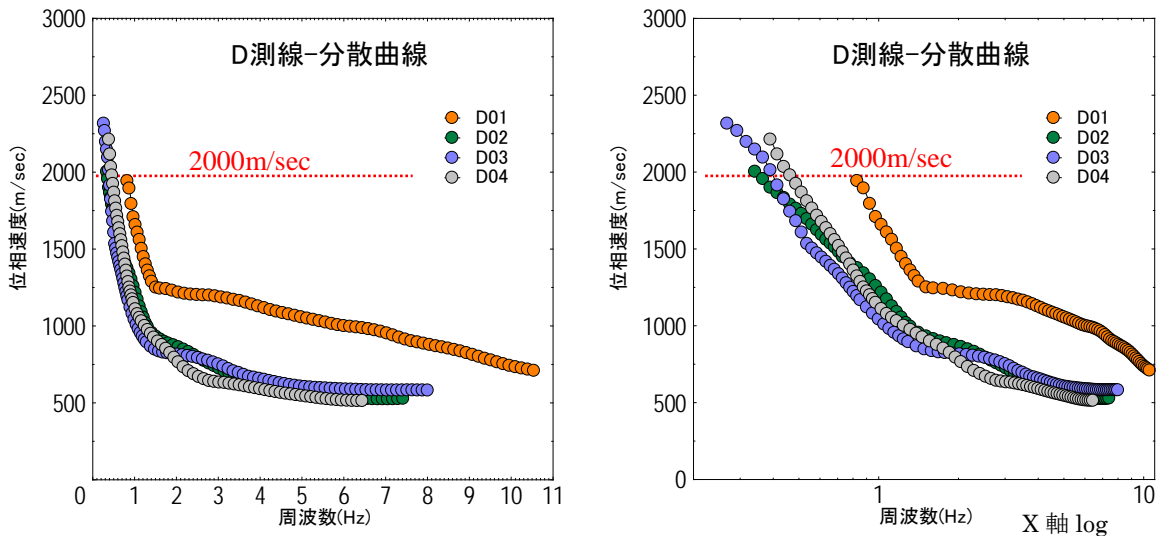


図 5.39 2019D 測線の分散曲線の重ね合わせ (左：周波数リニア表示、右：周波数対数表)

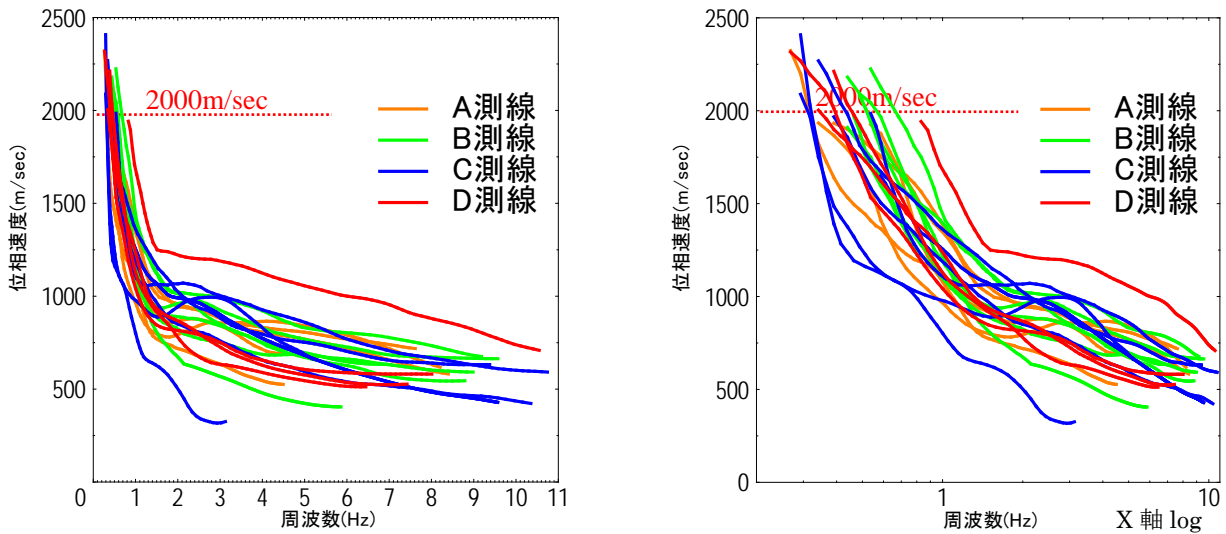


図 5.40 全測線の分散曲線の重ね合わせ（左：周波数リニア表示、右：周波数対数表示）

A～D各測線および全地点の分散曲線の重ね合わせ図(図 5.36～図 5.39)をみると、C-02、D-01を除いて類似の分散曲線を示し、構造的にはおおむね類似していることがわかる。

各測線の特徴を以下に述べる。

A 測線では、再観測を行った A-01 を除き低周波数側で得られた位相速度が 2000m/sec 未満である。

A 測線では、他の測線ほど低周波数（長周期）の波まで観測されていない。

これは、A 測線の観測時（2018 年 11 月）において低周波数側のパワーがより小さいため、観測時の気象条件（長周期微動の発生要因と考えられる海洋波浪が低調）によるものと考えられる。

B 測線は、A 測線と分散曲線の傾向は似ているが、おおむね 2000m/sec 以上の位相速度が得られている。

C 測線では、C-02 を除いて類似の分散曲線を示す。

C 測線では、C-01 と隣接の C-02 は高周波数側（1Hz 以上）の分散傾向が異なることから浅部構造が異なるが、低周波数側（1Hz 以下）の分散傾向は似ており、深部構造は類似していることが示唆される。また、C-01 では 2～3Hz で逆分散（2Hz より高周波側で位相速度が大きくなる）を示している。

C-03 と C-04 では、全体に分散曲線の傾向が良く似ている。C-05 は、ほかの地点よりも周波数に対して位相速度の立ち上がりが早いので、基盤深度は浅いと考えられる。

C-06 は地下構造の擾乱により、低周波数（長周期）側の分散曲線が得られなかった。

D 測線では、D-01 以外の地点で分散曲線の傾向が似ている。また、2000m/sec の位相速度に到達する周波数に着目すると、D-02 から D-04（東から西）にかけて基盤構造が浅くなる傾向が示唆される。